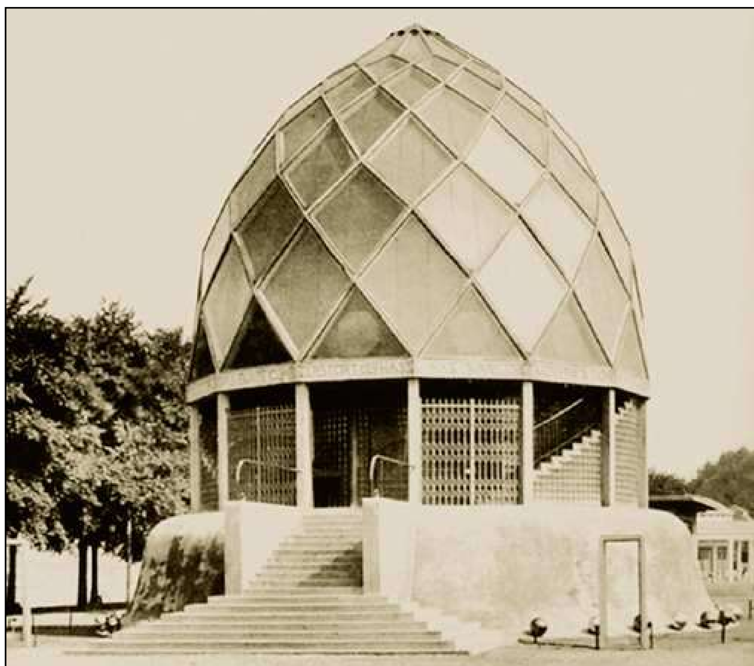


*Стеклянный павильон в Кёльне — пример сетчатой конструкции в европейской архитектуре первой четверти XX века. Построен для представительства стеклянной промышленности Германии на выставке Немецкого производственного союза.*

# БИОМОРФИЗМ И КОНСТРУКТОР ЭЛЬПЮЛЬ

**Здания, предметы и устройства, изменяющие свою форму? А почему бы и нет? Достаточно присмотреться к строению живых организмов, и станет ясно, что это реально.**

**Инженер Юрий Шевнин обратился к «главной молекуле жизни» — ДНК и разработал конструктор «эльпюль», впитавший в себя идеи строения нуклеосом и теломер. Их топология подсказывает решение проблемы изготовления узловых соединений для строительства сетчатых оболочек жилых и общественных зданий*.**

Биотек, или архитектурная бионика, — так называют современное течение «неорганической» архитектуры, в которой выразительность конструкций достигается биоморфными формами. Элементы организации живой жизни прослеживаются в зданиях немецкого экспрессионизма 1910—1920-х годов, среди которых можно выделить Стеклянный павильон, построенный Бруно Таутом в 1914 году в Кёльне. Важнейший элемент этой прозрачной конструкции — сетчатый купол из цветного стекла. Использование структур на основе сетчатых оболочек — один из основных способов создания конструкций стиля хайтек с криволинейными очертаниями. Основоположник этого вида конструкций — Владимир Георгиевич Шухов, запатентовавший свою первую сетчатую несущую оболочку ещё в 1895 году.

В 1920-х годах в советском художественном авангарде возникло «органическое» течение во главе с М. Матюшиным. Это архитектурное направление провозглашало своей задачей создание сооружений, форма которых вытекала бы из их конкретного назначения и условий окружающей среды, подобно форме живых организмов. Но только в 1960-е годы архитекторы всерьёз занялись проектированием сооружений, имитирующих органические формы. Основное препятствие в развитии архитектурной бионики — неприятие биоморфных криволинейных форм и оболочек сторонниками консервативной прямоугольной планировки и конструктивных схем зданий.

### РАЗНООБРАЗИЕ ПРИРОДНЫХ ФОРМ И АЛГОРИТМ СПИРАЛИ

Природа неохотно использует жёсткие материалы, неспособные к деформации. Посмотрите, как легко капля воды, живая клетка или микроорганизм меняют свою форму. В нашем теле лишь скелет состоит из жёсткого материала и работает на сжатие, бóльшая же часть «биологического конструктора» — мягкие и упруго-гибкие ткани, работающие на растяжение. Эти упругие ткани снижают нагрузку на хрупкие кости скелета. Эластичные ткани способны к обратимой упругой деформации при нагрузках в 1000 раз больших, чем те, на которые рассчитаны искусственно созданные конструкции.

Совершенно другую картину мы видим в архитектуре. Приверженцы традиционной европейской школы жёстких, тяжёлых и хрупких конструкций создают мир,

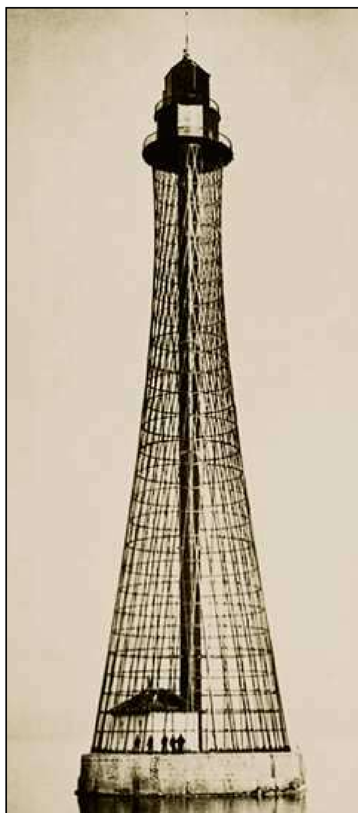
---

* Статья была представлена на конкурс научно-популярных статей «Био/мол/текст-2012» в номинации «Своя работа» и удостоена специальной премии.

в котором страшные последствия землетрясений и наводнений стали нормой. Более того, обеспечение жёсткости и одновременно устойчивости сооружения обходится значительно дороже (в плане и материальных и энергетических затрат), чем создание упругих и пластичных конструкций. Для достижения больших обратимых деформаций сооружения требуется много простых и надёжных шарнирных узлов, производство которых кажется сложной технологической задачей. Но ведь природа создаёт шарнирные узлы любой формы! Образец отличного природного решения узлов и соединений в пластичной структуре, достойный подражания, безусловно молекула ДНК.

ДНК представляет собой упруго-гибкую нить, способную скручиваться в тугую спираль. Для того чтобы эта «молекула жизни» могла поместиться в ядре клетки, она плотно скручена. Упакованная при помощи белков гистонов, она имеет вид бусин, называемых нуклеосомами. Это первый уровень компактной упаковки ДНК. В хромосомах ДНК свёрнута ещё несколько раз и образует более компактные структуры. Вероятно, чем выше степень суперскрученности молекулы, тем выше её способность противостоять разрушающим нагрузкам одновременно с увеличением содержащейся информации в единице её объёма. По форме нуклеосома представляет собой, условно, цилиндрический шарнир диаметром 11 нм и высотой 6 нм. ДНК закручивается вокруг нуклеосомы, делая почти два витка.

Эта конструкция соединения может быть взята на вооружение для создания сетчатых оболочек макроскопических размеров, в

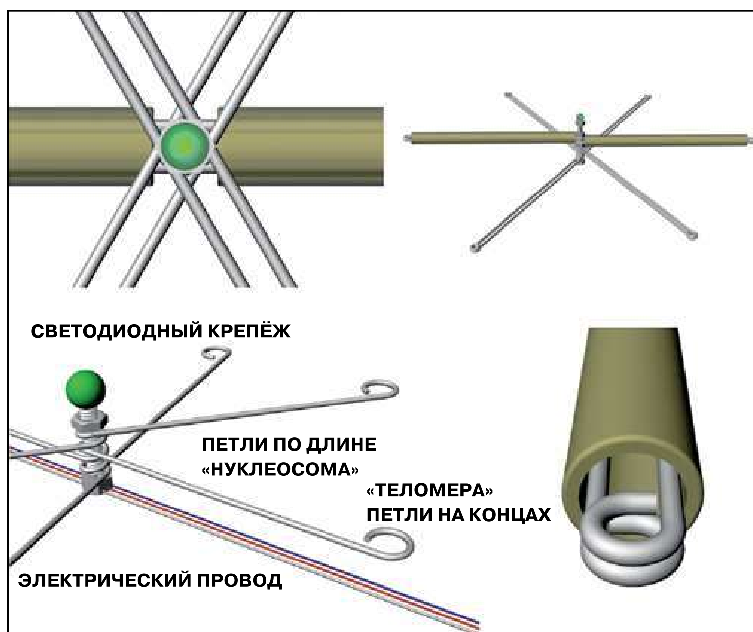


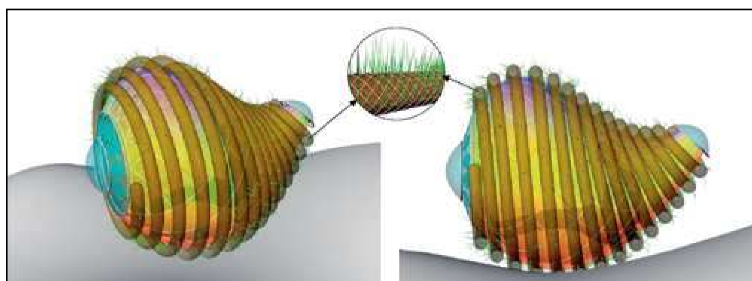


*Модель соединительного узла — аналога соединения ДНК-нуклеосома. Молекула ДНК делает около двух витков вокруг цилиндрической нуклеосомы.*

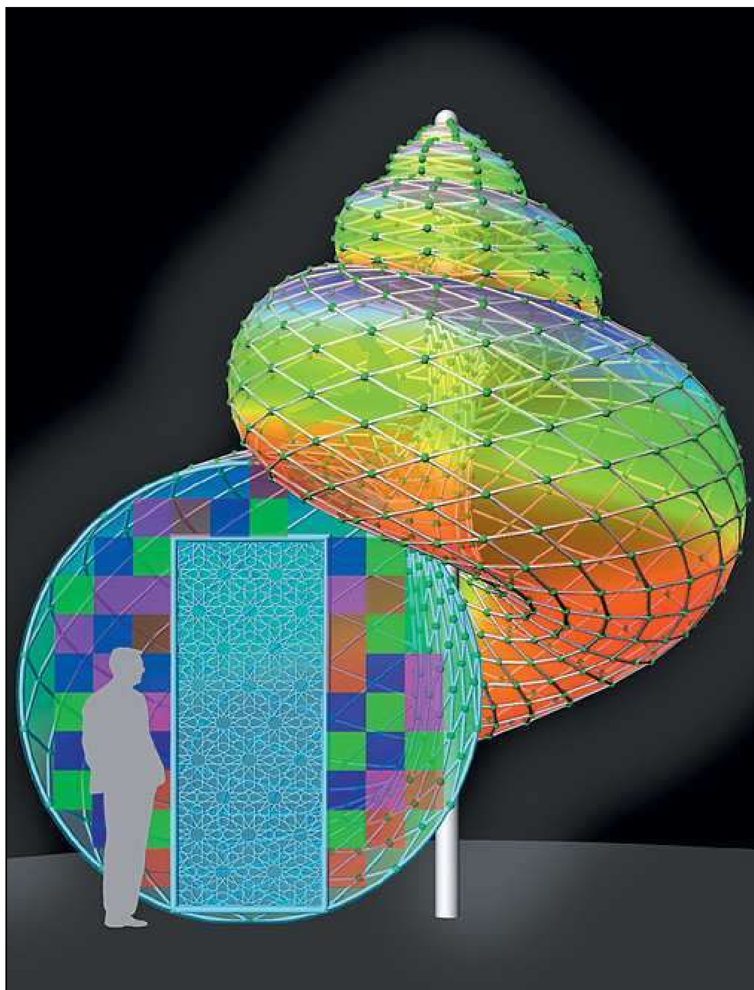
◀ *Аджигольский маяк Шухова недалеко от Херсона. Построен в 1911 году.*

*Возможные варианты узлов и соединений в сетчатых конструкциях. Трубчатые насадки на упруго-гибкие стержни из кевлара или пружинной проволоки работают на сжатие, стержни — на растяжение. Шарнирные соединения изготавливаются из трубчатых элементов с резьбой для гаек.*



*Светящиеся пульсирующие коконы — биореакторы для производства электричества и отопления автономных домов-оболочек. Могут использоваться для домашнего выращивания растений, в том числе водорослей, с возможностью наблюдения за их ростом под микроскопом на экране цифрового телевизора.*



*Проект дома «улитка на склоне» из прозрачного цемента с сетчатым каркасом для путешествий.*

том числе зданий и средств передвижения. Сборку такой оболочки можно осуществить наложением друг на друга упруго-гибких стержней в параллельных плоскостях. Их связывают петлями, расположенными по бокам стержня и на его концах. Фиксировать элементы сетчатой оболочки и её форму можно также с помощью упруго-гибких стержней, трубчатых насадок и петель-витков. Упруго-гибкие стержни работают на растяжение, а трубчатые насадки на них — на сжатие. Образуемая таким образом поверхность сетчатой оболочки состоит из треугольных или полигональных ячеек.

Этот подход уже используют в нанотехнологиях. Длина элементов для сетчатых оболочек из полимерных «молекул жизни» может составлять всего около 800 нм, а цилиндрических шарниров — 20 нм. Такие оболочки со временем станут основой для получения элементов электронных и оптических устройств и новых лекарственных форм, для создания сетчатых имплантатов, каркасов для выращивания тканей и других биодеградируемых структур. Самое интересное в этих наноструктурах — узлы соединений. Для их реализации в макромире на смену сварке и сверлению должна прийти технология спиральной гибки. С её помощью люди смогут самостоятельно возводить персональные дома-оболочки, устройства любых форм и размеров и в кратчайшие сроки осваивать новые территории.

И хотя пока это только мечты, уже сегодня можно собрать светодиодный светильник для домашних растений, сделать светящийся кокон для сохранения тепла или юрту для путешествий. Для этого достаточно воспользоваться бионическим конструктором, вобравшим в себя идеи строения живого организма.

## БИОНИЧЕСКИЙ КОНСТРУКТОР

Бионический конструктор имеет простые и равнопрочные шарнирные соединения, подобные нуклеосоме с «навёрнутой» на неё молекулой ДНК. Стержни бионического конструктора закручиваются или загибаются с определённым шагом, образуя петли, и по структуре напоминают белок коллаген. Стержни и петли формируют силовые ячейки, которые заполняют теплоизолирующими панелями или армоцементом. Шарнирные связи между петлями создают винты с гайками. На стержнях лёгких оболочек имеются трубчатые насадки, аналогичные микротрубочкам в живой клетке — внутриклеточным белковым структурам, представляющим собой полые цилиндры. Они служат для увеличения прочности и устойчивости упруго-гибких стержней из пружинной стали или кевлара. С помощью такого конструктора можно быстро и просто моделировать любые сложные поверхности с ячейками любых форм: треугольными, пентагональными, ромбическими, гексагональными, Вороного, Делоне и т.д.

Каркас, собранный по технологии спиральной гибки, в 20 раз легче традиционного,

и при этом его практически невозможно сломать. Шарниры и стержни, подобно пружине, отвечают на разрушительные нагрузки упругим и обратимым изменением формы. Каркас складывается по длине и ширине; все его элементы взаимозаменяемы и могут использоваться многократно. Кинематическая оболочка способна стать несущей конструкцией жилого сооружения. При необходимости жилое пространство легко увеличивается присоединением новых оболочек к старым.

Если в ДНК последовательность нуклеотидов служит генетическим кодом, то последовательность винтовых соединений элементов каркаса дома определяет его параметры и форму. С помощью компьютерной программы можно в течение часа рассчитать оптимальную форму и механические свойства каркаса с учётом индивидуальных предпочтений. Все поверхности «программируются» на определённые требования: устойчивость к перепадам температуры, механическим ударам, ураганному ветру, сейсмостойкость и др.




*Конструкция «эльпюль», сочетающая в себе два вида поверхностей — гиперболическую (вогнутую) «эль» и выпуклую (эллиптическую) — «пюль».*

### КАПЛЕВИДНЫЕ ОБОЛОЧКИ ДЛЯ ЖИЗНИ, ИЛИ ЭЛЬПЮЛЬ-ФОРМЫ

Впервые исследование математических закономерностей сетчатых поверхностей провёл Пафнутий Львович Чебышёв в работе «О кройке одежды» (сообщение в «Association franchise pour l'Avancement des Sciences» от 28 августа 1878 года). Чебышёв установил математические принципы формообразования криволинейных поверхностей из плоских тканевых развёрток с четырёхугольными ячейками, наглядно продемонстрировав, что поверхность шара может быть полностью покрыта двумя изначально плоскими выкройками.

У Владимира Ивановича Вернадского в статье «О состояниях физического пространства» есть такое определение биосферы: «Биосфера представляет земную оболочку, в которой в состояниях пространства евклидовой трёхмерной геометрии косных естественных тел (кристаллов. — **Авт.**) включены дисперсным образом и в дисперсной форме бесчисленные мелкие римановские (эллиптические. — **Авт.**) пространства живого вещества. Связь между ними поддерживается только непрерывным биогенным током атомов (через гиперболические участки пространства Лобачевского. — **Авт.**)». К гиперболическим участкам могут относиться все виды связей, переходов и взаимодействий с внешней средой.

Криволинейное пространство Лобачевского — это гиперболоид, воронка. Сумма углов треугольника на поверхности такого пространства меньше 180°. Всё, что находится в гиперболическом участке пространства, перемещается. Примером может служить воронка жидкости. А вот пространство Римана — это сфера или эллипсоид. Сумма углов треугольника на эллиптической поверхности больше 180°. В гармоничном соче-

тании эти два пространства образуют каплевидную форму, то есть форму, которую принимает капля в условиях тяготения и на границе двух сред. В невесомости капля представляет собой сферу, но, деформируясь, она сочетает в себе участки с разной кривизной. Назовём такую форму «*эльпюль*», где «эль» обозначает поверхность вращения с гиперболической кривизной, а «пюль» — поверхность с положительной кривизной, то есть выпуклую. Отсюда и сам сетчатый бионический конструктор, позволяющий формировать любую поверхность, сочетающую разную кривизну, получил своё название.

Товарищ Травкин из старой данелиевской комедии «Тридцать три» говорил: «Старое не должно зачёркивать новое, а новое не должно зачёркивать старое». Это отличное руководство к действию для преображения старых городов. Возможности для такого преображения есть — широчайший выбор технологий и материалов. Нерешаемой проблемой остаётся лишь непреодолимое желание строить традиционные здания, неспособные к изменению формы и основанные на старых схемах жизнеобеспечения. Мешают нормы и правила, созданные в середине прошлого века, запрещающие строить здания с деформацией поверхности более чем на несколько миллиметров. Но если бы общество никогда не нарушало эти правила, мы бы никогда не увидели полёта вертолёта. Ведь жёсткие лопасти сломались бы при первом испытании.

**Юрий ШЕВНИН, инженер.**
*Рисунки автора.*



# ГИДРОСТАТИКА В МЕТАЛЛУРГИИ

**Доктор технических наук Виктор ЛУГОВСКОЙ, профессор, научный руководитель компании MLC Extrusion Systems; Геннадий ДАНИЛОВ, главный инженер компании.**

*Взрывное развитие аэрокосмической техники, атомного энергомашиностроения, других отраслей современной индустрии было невозможно без опережающего создания новых материалов и методов их обработки. Новый технологический процесс, разработанный в Израиле в прошедшее десятилетие, позволяет создавать материалы с новыми свойствами, повышать прочность и эксплуатационные качества традиционных материалов.*

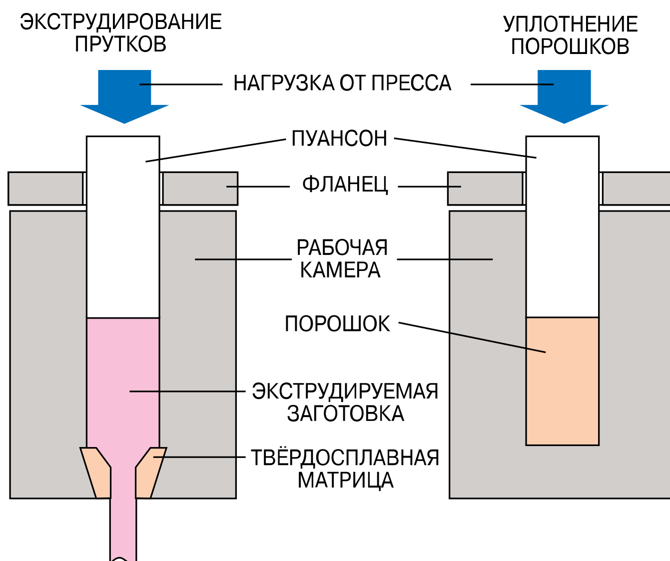
В конце XVIII века английский предприниматель и механик Джозеф Брама запатентовал конструкцию гидравлического пресса и предложил делать с его помощью свинцовые трубы продавливанием металла сквозь кольцевое отверстие матрицы, а в 1820 году инженер Томас Бурр для этой цели построил специальный пресс. К концу XIX века освоили изготовление экструдированием (то есть выдавливанием) уже медных труб и прутков.

Новый технологический процесс получил право на жизнь и стал быстро развиваться. Оказалось, что всестороннее сжатие заготовки пуансоном в контейнере повышает пластичность хрупких и малопластичных металлов и сплавов (рис. 1). Сегодня экструдирование горячих заготовок широко используется для получения из них прутков и профилей. Однако широкое применение этой технологии показало, что наряду с очевидными преимуществами она имеет и недостатки, затрудняющие её использование.

Так, при экструдировании материала между ним и

**Рисунок 1**

**Принципиальные схемы экструдирования прутков и уплотнения порошков жёстким пуансоном**



стенками контейнера, пуансоном и стенками матрицы возникает сухое трение, вызывающее интенсивный износ инструмента. Это, во-первых, удорожает процесс, а во-вторых, снижает качество поверхности и точность размеров готовой детали. Поэтому её приходится дополнительно калибровать на специальных станах.

При уплотнении порошков из-за трения их зёрен о стенки контейнера давление на материал уменьшается по мере удаления от торца пуансона. Плотность порошка снижается, а неравномерность уплотнения резко ухудшает качество спечённого изделия.

От этих недостатков удалось избавиться после перехода к технологии гидростатической экструзии и уплотнения порошков.

В начале XX века американский физик Перси У. Бриджмен провёл серию фундаментальных исследований различных материалов при высоком давлении (полученные им результаты были отмечены Нобелевской премией по физике в 1946 году). Исследуя поведение хрупких тел, он обнаружил, что под всесторонним давлением выше 15—20 ГПа (около 10 тысяч кгс/см$^2$) их свойства резко меняются. Даже довольно хрупкие материалы, вроде известняка и мела, становятся пластичными, и в этих условиях их можно без разрушения выдавливать через щель в матрице.

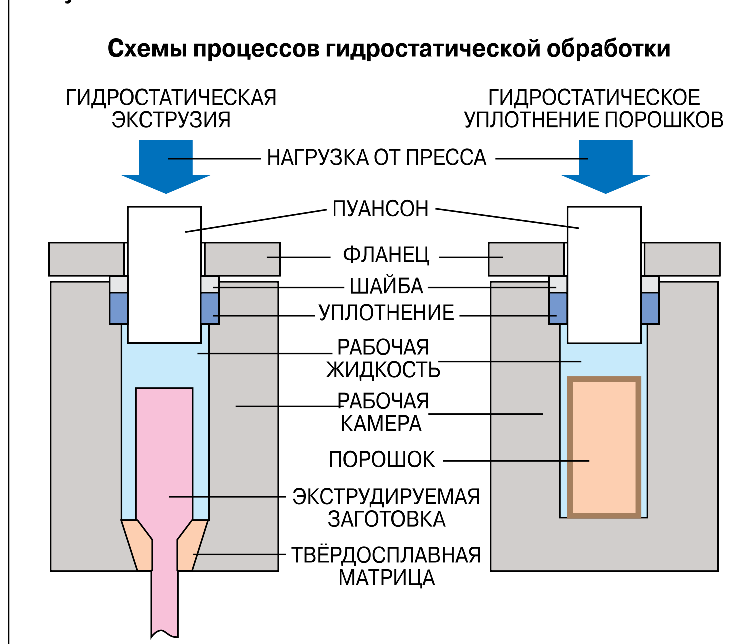
К семидесятым годам XX века результаты Бриджмена уже использовали в промышленности. Так, например, был разработан процесс гидростатической экструзии некоторых кристаллов, которые применяют в качестве датчиков ионизирующего излучения. Прочность этих исходно очень хрупких веществ существенно повышалась, работать с ними становилось гораздо проще. Гидростатическое уплотнение применялось и в порошковой металлургии.

При гидростатической экструзии за счёт высокого всестороннего сжатия происходит «замыкание» микродефектов обрабатываемого материала, его пластичность резко повышается, структура за счёт деформации улучшается. Появляется возможность получать профили сложной формы из малопластичных и хрупких материалов (например, молибдена, относительное удлинение которого менее 3%). При гидростатическом уплотнении порошков трение на поверхности заготовки отсутствует, поэтому давление распределяется равномерно по всему объёму, обеспечивая однородную плотность спрессованного изделия. Однако данная технология не получила широкого распространения по нескольким причинам.

Во-первых, использовались только относительно низкие рабочие давления — до 500—600 МПа (примерно 5—6 тысяч кгс/см$^2$). Освоенные к тому времени промышленные уплотнения (см. рис. 2), которые герметизируют рабочую камеру, и сами камеры не могли работать при более высоких давлениях. Рабочие камеры и уплотнения, созданные Перси У. Бриджменом, выдерживали давления до 10 ГПа, но это было лабораторное оборудование. Уплотнения выдерживали только несколько рабочих циклов, и значительная часть усилия пресса уходила на преодоление их трения о стенки рабочей камеры. Сами же рабочие камеры были небольшого размера и очень дороги. Это оборудование, вполне пригодное для лабораторных исследований, для работы в промышленных условиях не годилось.

Во-вторых, была освоена только холодная гидростатическая обработка: ни одна рабочая жидкость не выдерживала температуру выше 400°С. А это резко сужало область применения метода, так как большинство высокопрочных металлов и сплавов деформируют при температуре выше 1100°С. В лабораторных исследованиях «горячего» процесса часто использовали так на-

**Рисунок 2**



зываемые псевдожидкости, например коллоидный графит. Но процессы с его применением теряли ряд преимуществ из-за заметного внутреннего трения и были нетехнологичны.

Для внедрения гидростатической обработки в промышленности необходимо было повысить рабочие давления установок (по оценкам, до 2 ГПа) и освоить методы обработки раскалённых заготовок без применения специальных рабочих жидкостей и коллоидного графита.

К 2005 году компания MLC Extrusion Systems эти задачи решила. Обсуждая проблемы горячей гидростатической обработки, инженеры — специалисты по обработке металлов давлением обратили внимание на поведение воды на поверхности стального листа, нагретого выше 1000°С и проходящего через листопрокатный стан. На раскалённой поверхности вода практически не испаряется, так как под каплями воды образуется парогазовая прослойка, которая обладает крайне низкой теплопроводностью (что, кстати, создаёт технологические трудности при необходимости быстро охладить горячий металл).

Этот эффект и стали использовать при горячей гидростатической обработке (рис. 3). Ни возгорания рабочей жидкости (обычно — маловязкого машинного масла), ни взрыва не происходит, так как в камере практически нет кислорода, а мгновенное повышение давления стабилизирует парогазовую прослойку вокруг горячей заготовки, экранируя её от масла. Эксперименты, проведённые в MLC Extrusion Systems, показали: заготовка в масле под давлением выше 150—200 МПа остывает в полтора-два раза медленнее, чем на открытом воздухе.

После полугода экспериментов процесс горячей гидростатической экструзии был запатентован (патент США № 7,250,131; патент PCT WO 2002/026409) и используется фирмой при выполнении заказов.

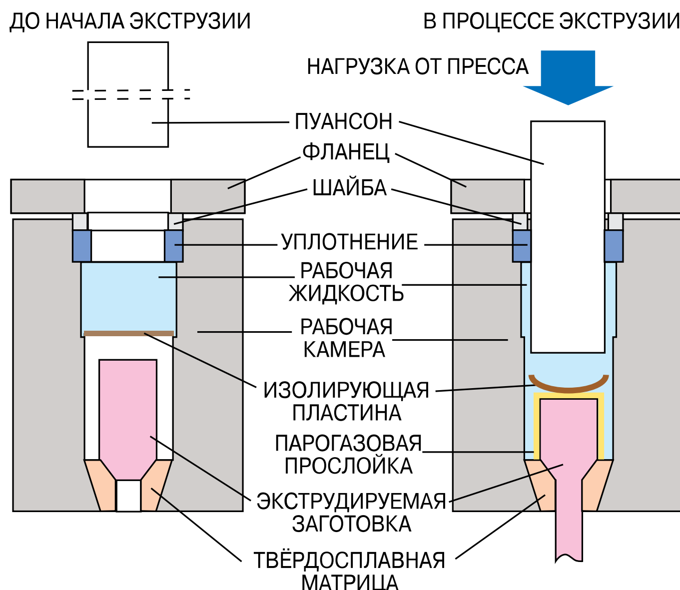
Промышленные уплотнения для сверхвысоких давлений до 2 ГПа должны отвечать ряду часто противоречивых требований. Они должны быть долговечными, то есть выдерживать сотни циклов нагружения и создавать малое сопротивление трения. Это сразу исключает возможность использовать многорядные конструкции с применением эластичных материалов.

С другой стороны, под действием сверхвысоких давлений внутренний диаметр камеры увеличивается: 50-миллиметровую камеру с толщиной стенки 150 мм давление 2000 МПа раздувает примерно на 0,7 мм. Конструкция уплотнения должна компенсировать возникающий зазор, а металлический уплотняющий элемент — иметь достаточную прочность, чтобы не разрушаться под действием давления. Однако в начальный период подъёма давления жёсткий металл не сможет обеспечить герметичность, и в узле уплотнения необходимо иметь ещё и эластичную деталь. При увеличении давления сверх некоторого предела она должна исключаться из работы из-за малой прочности. Кроме того, нужно обеспечить быструю замену всего узла уплотнения.

Уплотнение, разработанное нашей фирмой (патент США № 7,121,554; патент PCT WO/2002/055913), от-

**Рисунок 3**

**Схема процесса горячей гидростатической экструзии**




*В рабочую камеру помещают горячую заготовку и стальную прокладку над ней. Поверх прокладки заливают рабочую жидкость, и рабочий пуансон быстро движется вниз. Давление в камере над заготовкой возрастает, прокладка деформируется, пропуская рабочую жидкость в нижнюю часть камеры, и за счёт движения плунжера давление вокруг раскалённой заготовки, окружённой парогазовой прослойкой, очень быстро, за 0,01—0,02 с, возрастает до 150—200 МПа и продолжает увеличиваться до рабочего давления.*

вечает всем этим требованиям (рис. 4).

При низком давлении камеру цилиндра герметизируют тефлоновое кольцо и плотная посадка стального кольца (рис. 4А). При повышении давления и увеличении деформации цилиндра (рис. 4Б) стальное кольцо, распираемое внутренним давлением, прижимается к внутренней поверхности цилиндра, компенсируя его деформацию. Кроме того, оно прижимается к нижнему торцу бронзового кольца, герметизируя камеру. Тефлоновое кольцо, подвергнутое всестороннему сжатию, уже практически не касается поверхностей плунжера и металлических колец. Потери на трение в этом уплотнении невелики благодаря малой площади контакта бронзового кольца с поверхностью плунжера и хорошим антифрикционным свойствам тефлона.

Эксперименты, проведённые с этими уплотнениями, показывают, что они работают при давлении до 2 ГПа в камерах с внутренним диаметром до 150—200 мм (то есть на установках мощностью до 6300 тонна-силы).

Проектирование камер высокого давления вызывает значительные трудности, так как условия их работы вплотную приближаются к пределу прочности материала камер, который вдобавок очень дорог. Это заставляет тщательно подбирать размеры рабочей камеры и наилучшим образом использовать возможности материала. С этой целью было разработано программное обеспечение для выбора оптимальных по прочности конструкций камер для работы с давлениями до 2 ГПа.

В процессе исследования и проектирования оборудования были освоены две группы технологических процессов.

**Холодная и горячая гидростатическая экструзия.** Рабочая жидкость при сверхвысоком давлении проникает между материалом и стенками матрицы, создавая практически жидкое трение. Это позволяет получать большие вытяжки за один проход, уменьшает износ инструмента, повышает точность размеров поперечного сечения изделия и качество его поверхности, соответствующего чистовой обработке.

**Холодное и горячее гидростатическое уплотнение порошков.** Значительную часть режущего инструмента изготавливают методом порошковой металлургии из сырья на базе карбида вольфрама и других металлокерамик, а в машиностроении и приборостроении широко используют детали из спечённых металлических и керамических порошков.

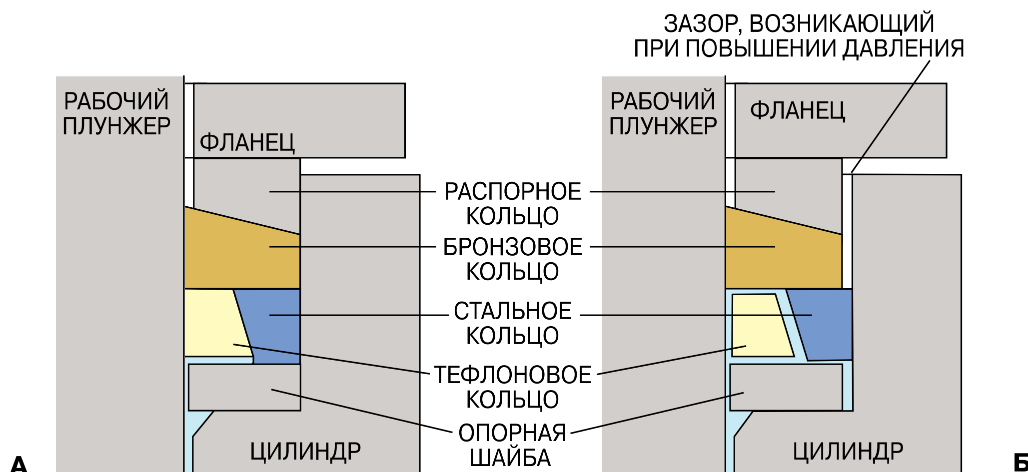
Перед спеканием порошки формуют и уплотняют, обычно добавляя в них органическую связку. За счёт её выгорания и неплотной упаковки частиц порошка в детали остаются микроскопические поры.

Уплотнение порошка сверхвысоким давлением не только снижает пористость, но и значительно уменьшает усадку при спекании. Это особенно чётко ощущается при изготовлении деталей малых размеров, например микросвёрл для электронной и электротехнической промышленности.

Считалось, что порошок существенно уплотняется при давлении до 80—100 МПа, а при росте до 600—700 МПа его плотность повышается

**Рисунок 4**

**Уплотнение на давление до 2,0 ГПа**




*Бронзовое кольцо уплотняет поверхность плунжера, кольцо из пластичной стали уплотняет внутреннюю поверхность цилиндра, тефлоновое кольцо служит для уплотнения при низком давлении. Распирающееся кольцо при повышении давления создаёт радиальную составляющую, которая прижимает бронзовое кольцо к поверхности плунжера.*




***Некоторые изделия, получаемые холодной и горячей гидростатической экструзией и гидростатическим уплотнением порошков.***
*1 — образец из порошка вольфрама, скомпактированный без органической связки и обработанный до спекания; 2, 3 — профили из магниевого сплава, полученные горячей гидростатической экструзией; 4 — профиль из среднеуглеродистой стали, полученный горячей гидростатической экструзией; 5, 6 — пресс-остатки профилей из магниевого сплава; 7 — пресс-остаток трубы с крестообразным оребрением из меди; 8 — деталь из неспечённого порошка вольфрама, уплотнённого жидкостью сверхвысокого давления; 9 — толстостенная труба из магниевого сплава, полученная горячей гидростатической экструзией; 10 — труба из меди, полученная горячей гидростатической экструзией; 11,12 — оребрённая труба из меди, полученная холодной гидростатической экструзией.*

мало. Однако проведённое нами исследование порошков металлического вольфрама и карбида вольфрама доказало, что под действием сверхвысокого давления (порядка 1800 МПа) можно получить спрессованный образец плотностью 88—95% от плотности сплошного материала.

Усадка при спекании образцов, уплотнённых давлением 1800—1900 МПа, была во много раз меньше, чем при спекании образцов с органическим связующим. Кроме того, уплотнённые без органической связки образцы после снятия давления не только сохраняли форму, но и оказались настолько прочны, что допускали обработку *до спекания* обычным твердосплавным инструментом, а не дорогостоящим алмазным, расход которого очень велик.

В качестве примера использования уплотнения жидкостью сверхвысокого давления можно привести неспечённый стержень из уплотнённого при давлении 1600 МПа порошка вольфрама (W — 90%, Fe + Ni — 10%) плотностью 90%, который частично обработан точением (поз. 1 на фото вверху). На позиции 8 — деталь из того же порошка, полученная токарной обработкой до спекания после уплотнения давлением 1600 МПа (плотность 90%).

При уплотнении жёстким пуансоном трение порошка о стенки контейнера уменьшает уплотняющее усилие по мере удаления от торца пуансона. Поэтому для получения равномерной плотности по высоте приходится работать с невысокими столбиками порошка («таблетками»), что существенно снижает производительность процесса. Однако даже в «таблетках» плотность в поперечном направлении остаётся неравномерной за счёт сдвигающих усилий из-за трения со стенками контейнера.

Гидростатическое уплотнение обеспечивает высокую равномерность плотности порошка благодаря всестороннему давлению жидкости и отсутствию контакта порошка со стенками контейнера. Поэтому производительность этого процесса может быть очень высока, так как работать можно не с «таблетками», а с длинными стержнями без снижения качества заготовок.